

**Préparation Niveau II**

# **Physique 2**



**Toxicité des gaz  
Dissolution des gaz  
Notions d'optique et d'acoustique**

Club Subaquatique de Charenton

Vincent BONNEMAISON  
M F 1 ° F F E S S M

Version 1 : Vincent Bonnemaison 22.01.2003

Version 2.2 : Révision Bernard Largeault 16.01.2011

## TABLE DES MATIERES

1	TOXICITE DES GAZ .....	3
<b>1.1</b>	<b>JUSTIFICATION PAR RAPPORT A LA PLONGEE .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2</b>	<b>MISE EN EVIDENCE .....</b>	<b>3</b>
1.2.1	1 <sup>ERE</sup> EXPERIENCE .....	3
1.2.2	2 <sup>EME</sup> EXPERIENCE .....	4
1.2.3	3 <sup>EME</sup> EXPERIENCE .....	4
<b>1.3</b>	<b>LOI DE DALTON.....</b>	<b>4</b>
1.3.1	ENONCE.....	4
1.3.2	FORMULE MATHEMATIQUE .....	4
<b>1.4</b>	<b>APPLICATIONS A LA PLONGEE.....</b>	<b>5</b>
<b>1.5</b>	<b>CONSEQUENCES.....</b>	<b>5</b>
<b>1.6</b>	<b>EXERCICES D'APPLICATION .....</b>	<b>5</b>
<b>1.7</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>5</b>
2	DISSOLUTION DES GAZ .....	6
<b>2.1</b>	<b>JUSTIFICATION PAR RAPPORT A LA PLONGEE .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2</b>	<b>MISE EN EVIDENCE .....</b>	<b>6</b>
<b>2.3</b>	<b>ENONCE DE LA LOI DE HENRY .....</b>	<b>7</b>
<b>2.4</b>	<b>APPLICATIONS A LA PLONGEE.....</b>	<b>7</b>
<b>2.5</b>	<b>CONSEQUENCES.....</b>	<b>8</b>
3	NOTIONS D'OPTIQUE.....	9
<b>3.1</b>	<b>JUSTIFICATION PAR RAPPORT A LA PLONGEE .....</b>	<b>9</b>
<b>3.2</b>	<b>REFLEXION .....</b>	<b>9</b>
<b>3.3</b>	<b>REFRACTION.....</b>	<b>9</b>
<b>3.4</b>	<b>ABSORPTION .....</b>	<b>9</b>
<b>3.5</b>	<b>DIFFUSION.....</b>	<b>10</b>
<b>3.6</b>	<b>APPLICATIONS A LA PLONGEE.....</b>	<b>10</b>
<b>3.7</b>	<b>EXERCICE D'APPLICATION .....</b>	<b>12</b>
4	NOTIONS D'ACOUSTIQUE .....	13
<b>4.1</b>	<b>JUSTIFICATION PAR RAPPORT A LA PLONGEE .....</b>	<b>13</b>
<b>4.2</b>	<b>VITESSE DU SON .....</b>	<b>13</b>
<b>4.3</b>	<b>APPLICATIONS A LA PLONGEE.....</b>	<b>13</b>
<b>4.4</b>	<b>EXERCICE D'APPLICATION .....</b>	<b>13</b>

# 1 TOXICITE DES GAZ

## 1.1 Justification par rapport à la plongée

Lors d'une plongée loisir classique, le plongeur respire de l'air.

L'air est un mélange gazeux dont la composition est la suivante :

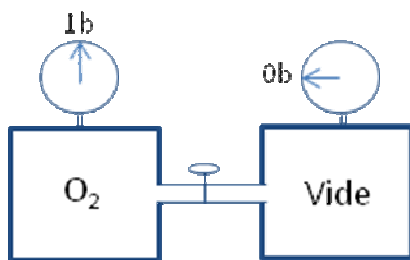
- 78,03% d'azote ( $N_2$ ),
- 20,99% d'oxygène ( $O_2$ ),
- 0,03% de gaz carbonique ( $CO_2$ ),
- 0,95% de gaz rares.

Pour simplifier les calculs éventuels, nous prenons :  $O_2 = 20\%$  et  $N_2 = 80\%$

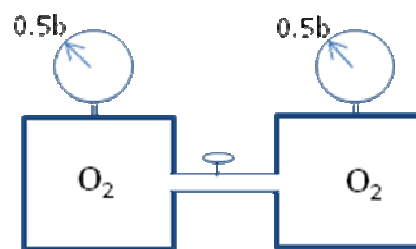
Nous allons voir dans ce cours que tous les gaz deviennent toxiques à une certaine pression. A la recherche de l'autonomie, vous devez connaître les effets de ces gaz sur le plongeur afin d'en éviter tout effet indésirable ou dangereux.

## 1.2 Mise en évidence

### 1.2.1 1<sup>ère</sup> expérience

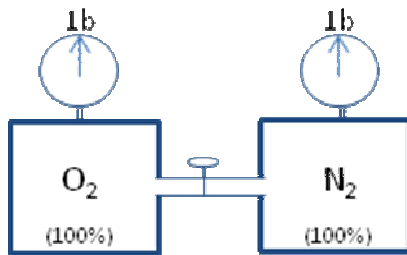


Le récipient de gauche contient de l' $O_2$  à la pression de 1 bar. Le vide a été effectué dans le récipient de droite.

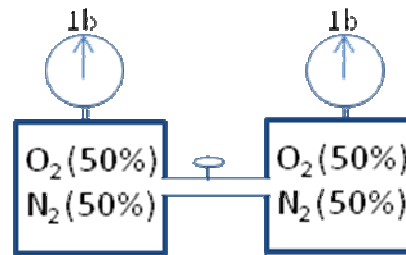


On ouvre le robinet ; L' $O_2$  contenu dans le récipient de gauche se répartit dans les deux récipients jusqu'à égalité des pressions de 0.5 bar.

L'oxygène a envahi tout l'espace qui lui est offert, entraînant un équilibre de pression dans les deux récipients ( $P \times V = Cte$ ).

1.2.2 2<sup>ème</sup> expérience

Le récipient de gauche contient de l'O<sub>2</sub> à la pression de 1 bar.  
Le récipient de droite contient de l'N<sub>2</sub> à la pression de 1 bar.



On ouvre le robinet ; Les deux gaz se répartissent dans les deux récipients. La pression reste à 1 bar dans chaque récipient qui contient 50% d'O<sub>2</sub> et 50% de N<sub>2</sub>

Les deux gaz à 50% de concentration ont une pression totale de 1 bar. Chaque gaz fournit une pression de 0,5 bar.

=> La **pression partielle** d'un gaz constituant un mélange est la pression qu'aurait ce gaz s'il occupait seul le volume total.

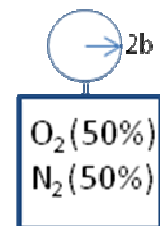
1.2.3 3<sup>ème</sup> expérience

A partir de la 2<sup>ème</sup> expérience, on comprime les gaz dans un seul des deux récipients d'origine.

D'après la loi sur la compressibilité des gaz (Boyle-Mariotte), le volume ayant diminué de moitié, la pression a doublé.

Le mélange a une pression de 2 bars composée de 1 bar d'O<sub>2</sub> et 1 bar de N<sub>2</sub>.

On peut maintenant énoncer la loi.



## 1.3 Loi de DALTON

## 1.3.1 Enoncé

**A température donnée, la pression absolue d'un mélange gazeux est égale à la somme des pressions partielles des gaz qui le composent.**

## 1.3.2 Formule mathématique

Exemple de l'air :

$$P_{\text{Pair}} = P_{\text{PN}_2} + P_{\text{PO}_2} + P_{\text{PCO}_2} + P_{\text{Pgaz rares}}$$

La pression partielle d'un gaz dans un mélange est égale au produit de la pression absolue par la concentration de ce gaz.

$$P_{\text{GAZ}} = P_{\text{abs.}} \times \%_{\text{gaz}}$$

#### 1.4 Applications à la plongée

- Elaboration des tables de plongée et indication des profondeurs maximales d'évolution.
- Plongée aux mélanges (NITROX).
- Oxygénothérapie hyperbare.

#### 1.5 Conséquences

Tous les gaz présents dans l'air sont toxiques à une pression donnée.

Ainsi :

- |  |                |                            |
|--|----------------|----------------------------|
| ➤ CO <sub>2</sub> : cause de l'essoufflement | à partir d'une | P <sub>PCO2</sub> > 0,02 b |
| ➤ N <sub>2</sub> : cause de la narcose       | à partir d'une | P <sub>PN2</sub> > 3,2 b   |
| ➤ O <sub>2</sub> : cause de l'hyperoxie      | à partir d'une | P <sub>PO2</sub> > 1,6 b   |
| ➤ O <sub>2</sub> : cause de l'hypoxie        | à partir d'une | P <sub>PO2</sub> < 0,17 b  |

#### 1.6 Exercices d'application

- A partir de quelle profondeur l'O<sub>2</sub> devient-il toxique ?
- Même question pour le N<sub>2</sub> ?
- Considérons de l'air (pour simplifier les calculs, on prend O<sub>2</sub>=20% et N<sub>2</sub>=80%), quelles sont les P<sub>PO2</sub> et P<sub>PN2</sub> à 30 mètres ?
  
- Exercices complémentaires pour la séance de travaux dirigés :
  - A quelle profondeur P<sub>PO2</sub> = 2 bars ?
  - Pour quelle proportion O<sub>2</sub> / N<sub>2</sub> a-t-on P<sub>PO2</sub> = 1,6 bars à 40 mètres ?

#### 1.7 Conclusion

Il ressort que des limitations de pression, donc de profondeur, nous sont imposées par les effets toxiques des gaz que nous respirons en plongée. Le non respect de ces limitations peut provoquer des accidents dits biochimiques (voir cours correspondant sur les accidents).

## 2 DISSOLUTION DES GAZ

### 2.1 Justification par rapport à la plongée

La dissolution est un phénomène rencontré quotidiennement :

- le sucre dans le café (solide dans un liquide),
- eau sur une craie (liquide dans un solide),
- boisson gazeuse (gaz dans un liquide).

Pour nous, plongeurs, le cas qui nous intéresse le plus est celui de la dissolution d'un gaz dans un liquide.

En effet, l'azote ( $N_2$ ) contenu dans l'air respiré va se dissoudre dans les liquides de l'organisme de façon plus importante lors de la plongée qu'en surface.

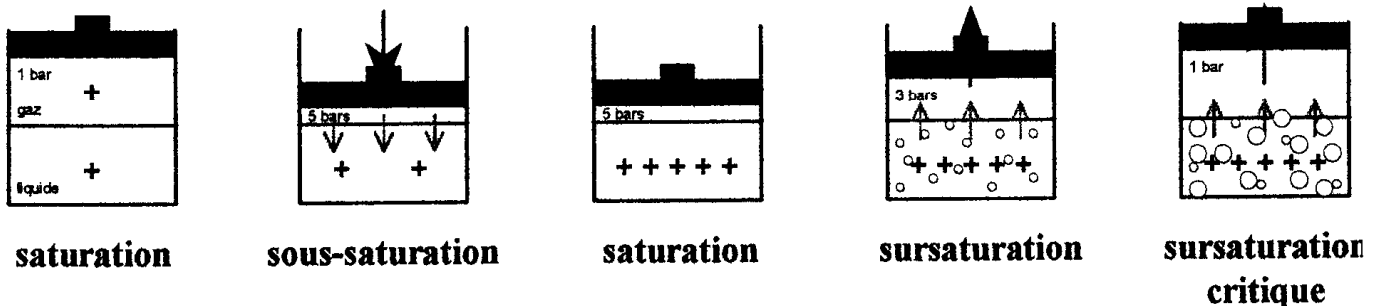
La compréhension de ce phénomène est nécessaire puisqu'il nous impose des règles de sécurité primordiales.

### 2.2 Mise en évidence

On met en contact un gaz sous pression et un liquide. On constate que la quantité de gaz dissoute augmente d'abord très rapidement, puis de plus en plus lentement jusqu'à atteindre une valeur qui ne varie plus et qui correspond à l'état de **saturation**

=> La dissolution d'un gaz dans un liquide est un processus qui dépend du temps.

#### *Dissolution d'un gaz dans un liquide*



A saturation, sous **1 bar**, la quantité de gaz dissoute est égale à **1xQ**.

Sous une pression de **5 bars**, on constate, après un temps nécessaire et suffisant pour atteindre la saturation, que cette quantité de gaz dissoute est égale à **5xQ**.

=> Il existe une relation entre la quantité de gaz dissoute à saturation et la pression que ce gaz exerce sur le liquide.

### 2.3 Enoncé de la Loi de HENRY

**A température constante et à saturation, la quantité de gaz dissoute dans un liquide est proportionnelle à la pression exercée par ce gaz à la surface de ce liquide.**

La quantité de gaz dissoute dans le liquide se définit comme étant la **Tension** de ce gaz. Elle est exprimée en bar. Elle est notée  $T_{\text{gaz}}$ .

*Pour mémoire, dans un mélange gazeux, on parle de pression partielle de ce gaz (voir cours précédent sur la toxicité des gaz).*

- On a **sous-saturation** si :            **Tension** < **Pression partielle**     $T < P_p$
- On a **saturation** si :                **Tension** = **Pression partielle**     $T = P_p$
- On a **sursaturation** si                **Tension** > **Pression partielle**     $T > P_p$
- On a **sur-saturation critique** si : **Tension** >> **Pression partielle**     $T \gg P_p$

L'azote est le seul gaz de l'air concerné par le mécanisme de dissolution, il convient de considérer qu'à saturation, on a :

$$T_{N_2} = P_{PN_2}$$

On définit enfin deux notions relatives aux mécanismes de dissolution :

- le gradient : c'est la différence entre la pression partielle du gaz à dissoudre et la quantité de gaz dissous :

$$G = P_{PN_2} - T_{N_2}$$

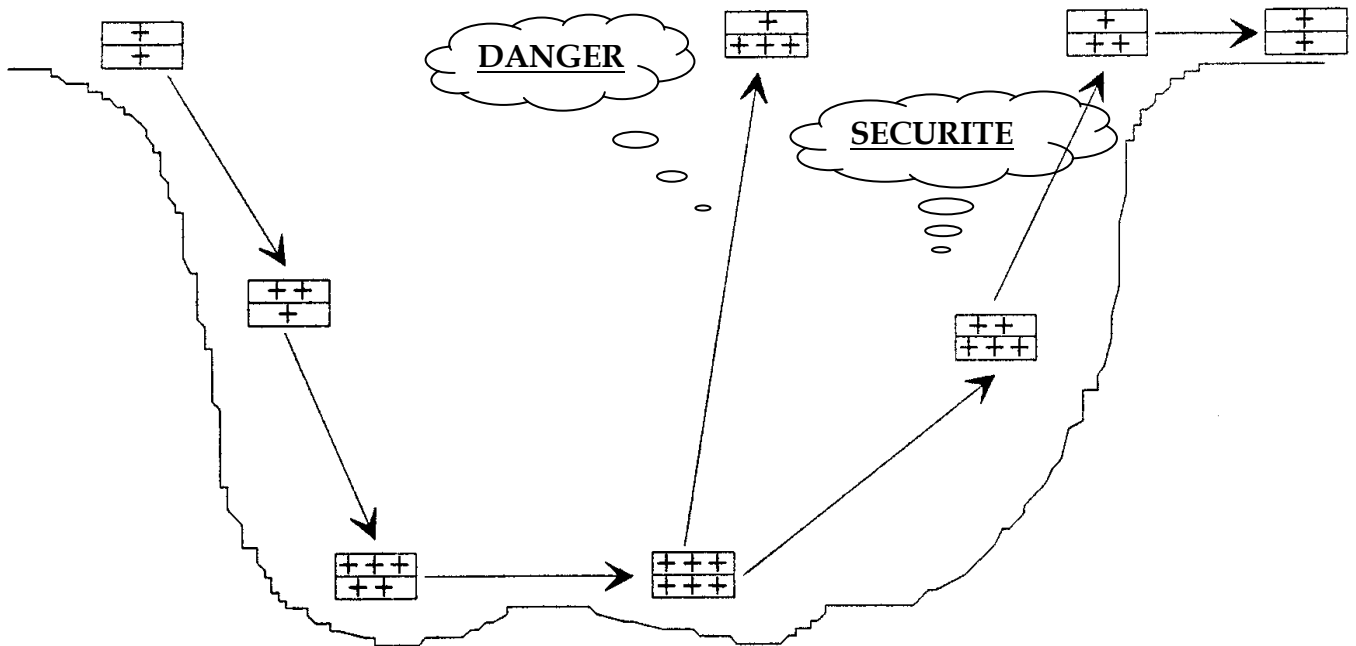
- la période : elle représente le temps nécessaire pour dissoudre (ou éliminer) la moitié du gradient. Elle varie selon le liquide (donc selon le tissu du corps) dans lequel le gaz ( $N_2$ ) se dissout.

### 2.4 Applications à la plongée

L'expérience précédente est directement transposable au plongeur en évolution. En effet, le corps humain est principalement constitué de liquides.

Dans l'air respiré, l'oxygène est consommé par l'organisme, l'azote quant à lui n'est que dissout et n'est pas consommé.

Au cours d'une plongée, on retrouve les différents états de dissolution comme indiqué dans le schéma suivant :



Un certain nombre de **facteurs** est susceptible de **favoriser** la **dissolution de l'azote**. Il est essentiel pour tout plongeur de les connaître afin de prévenir les **accidents de décompression** (voir cours sur les accidents) :

- La **profondeur** puisque la pression augmente avec elle,
- le **temps** de plongée
- l'**effort physique** avec l'accroissement de l'irrigation sanguine qu'elle va induire
- la surface d'échange, constante chez une même personne,
- le **froid** (la dissolution augmente avec la diminution de la température et inversement),
- la **nature du tissu**. Dans certains tissus, la dissolution de l'azote va se faire plus rapidement que dans d'autres.

Les tissus du corps humain étant très nombreux, on a choisi de les modéliser en "compartiments". Chacun d'entre eux est caractérisé par un coefficient de sursaturation critique (**Sc**). Il est défini par le rapport :

$$Sc = T_{N_2} / P_{Abs.}$$

Les **tables de plongée** constituent l'application de l'étude des mécanismes de dissolution.

Des tables de plongée, on obtient trois informations primordiales :

- la **courbe de sécurité**.
- les **vitesse de remontée**,
- les **paliers**.

## 2.5 Conséquences

La prévention des accidents de décompression passe par le strict respect des tables de plongée. Avoir compris les mécanismes de dissolution des gaz, particulièrement celui de l'azote dans le corps humain permet de prendre conscience de leur importance et d'accepter les protocoles qu'elles nous imposent.

### 3 NOTIONS D'OPTIQUE

#### 3.1 Justification par rapport à la plongée

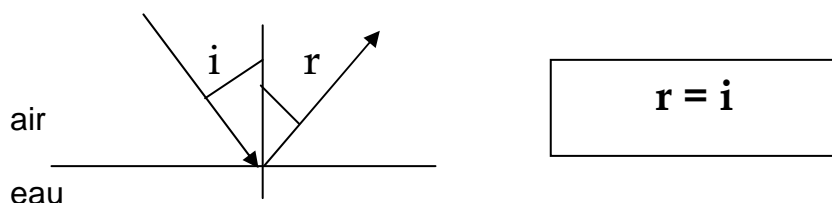
C'est votre expérience : on voit plus gros, on voit plus proche, les couleurs disparaissent...

L'objectif de ce cours est d'expliquer ces mécanismes et d'en déduire les règles de sécurité qu'ils nous imposent.

#### 3.2 Réflexion

L'exemple de ce phénomène est le miroir.

Le rayon est réfléchi par l'eau.

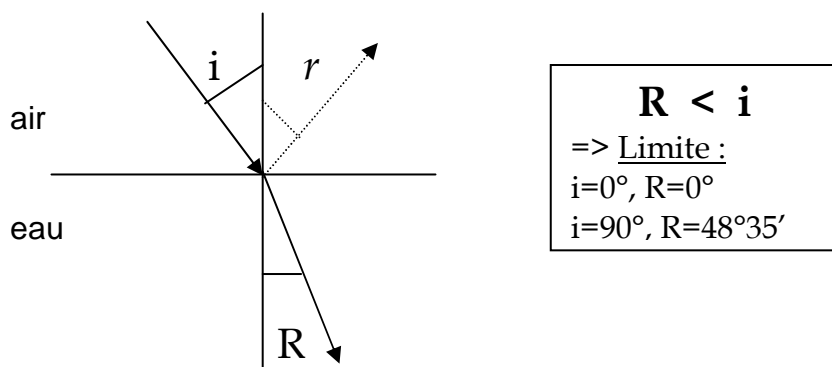


On dit que l'angle "réfléchi" est égal à l'angle "incident".

#### 3.3 Réfraction

L'exemple de ce phénomène est un bâton brisé.

Le rayon en passant de l'air à l'eau va suivre un cheminement différent lié aux différences de propriétés entre l'air et l'eau.



L'angle du rayon "Réfracté" est plus petit que l'angle du rayon "Incident". Le rayon est freiné quand il pénètre dans l'eau. Quand le rayon incident est à la verticale (soleil à midi  $i=0^\circ$ ), le rayon réfracté n'est pas dévié. Quand le rayon incident est rasant (soleil levant ou couchant  $i=90^\circ$ ), le rayon réfracté atteint l'angle limite de  $48^\circ 35'$ .

#### 3.4 Absorption

L'intensité lumineuse diminue progressivement avec la profondeur.

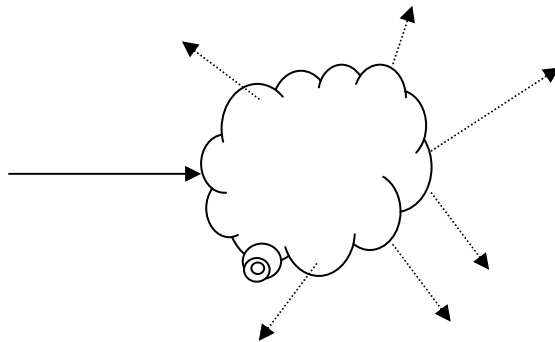
- 0m : 100%,
- 1m : 40%,
- 10m : 14%,
- 40m : 1,5%.

Les couleurs vont disparaître progressivement, par absorption, avec la profondeur :

- 5 m : le rouge,
- 10/15m : l'orangé,
- 15/25m : le jaune,
- entre 25 et 60m : le violet puis le bleu-vert,
- au delà de 60m : plus de couleur.
- à 400m : le noir total.

### 3.5 Diffusion

C'est l'effet combiné de la réflexion et de la réfraction sur les particules en suspension.



On peut observer ce phénomène en plongée lorsqu'on allume une lampe ou un phare dans une mer riche en plancton.

### 3.6 Applications à la plongée

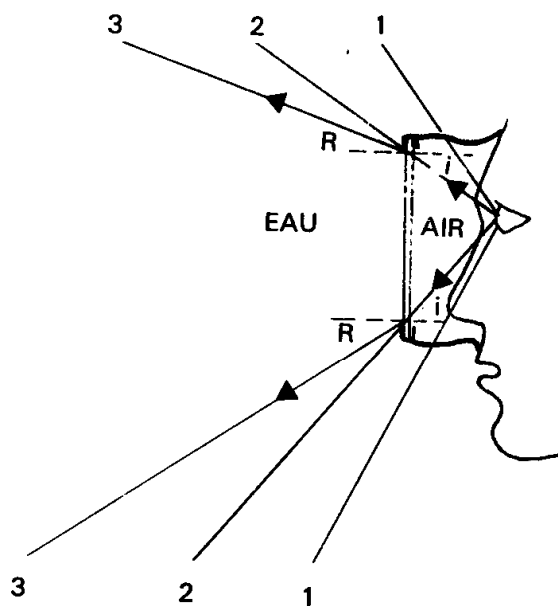
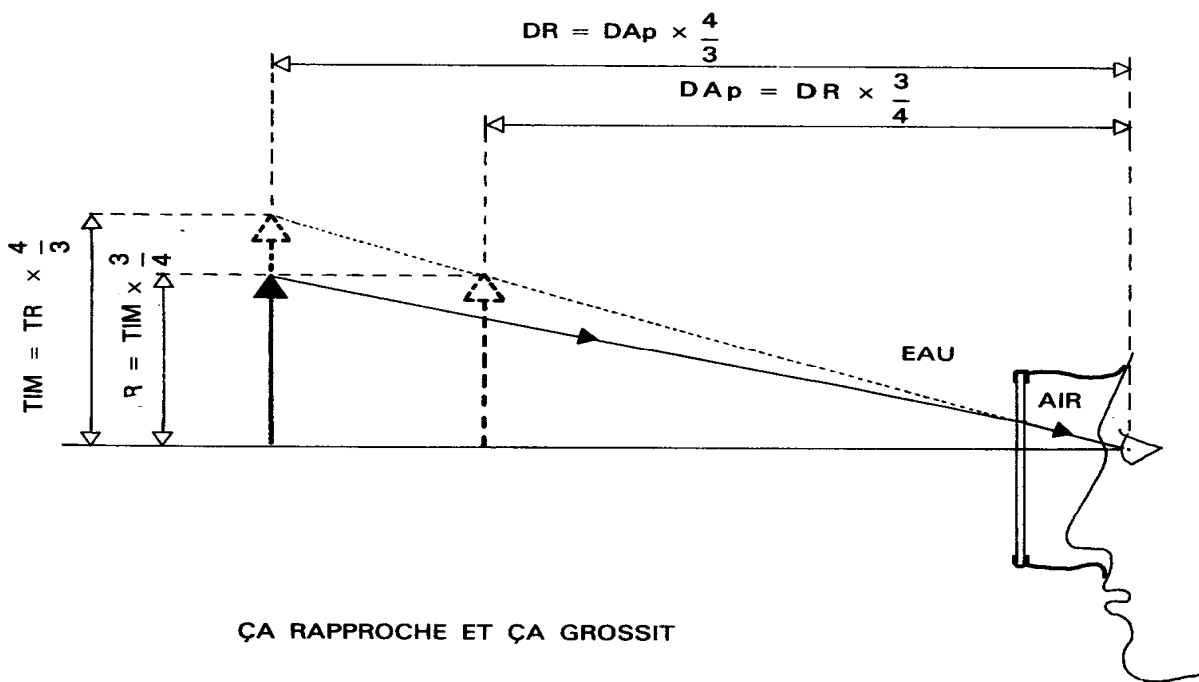
⇒ Sans masque, la vision sous marine est floue.

⇒ Avec le masque : effet d'une petite loupe : grossissement (ça rapproche et ça grossit) + rétrécissement du champ de vision (lié à la réfraction).

$$\text{Distance apparente} = \text{Distance réelle} \times 3/4$$

$$\text{Taille apparente} = \text{Taille réelle} \times 4/3$$

*Faites vous-même l'expérience de mettre votre montre (de plongée) dans votre lavabo rempli d'eau : vous observez l'effet loupe.*



1. CHAMP DE VISION A L'AIR SANS MASQUE
2. CHAMP DE VISION A L'AIR AVEC MASQUE
3. CHAMP DE VISION DANS L'EAU AVEC MASQUE :  $R < i$

Cette modification de nos perceptions sensorielles impose une règle de sécurité fondamentale à tous les stades de la plongée : le **tour d'horizon**

- tour d'horizon au fond pour voir ses coéquipiers,
- tour d'horizon au palier de 3 mètres avant de faire surface pour repérer d'éventuels bateaux
- tour d'horizon en surface pour repérer d'éventuels voiliers.

Ces mécanismes vont également imposer certaines précautions destinées à maintenir notre confort visuel :

- ne pas remuer le fond (diffusion sur les particules en suspension),
- emporter une lampe pour restituer les couleurs.

### **3.7 Exercice d'application**

Vous voyez une pièce d'or qui vous semble être à 6m de vous et qui semble faire 4cm de diamètre. Déterminez sa distance réelle et son diamètre réel ?

---

## 4 NOTIONS D'ACOUSTIQUE

### 4.1 Justification par rapport à la plongée

Le monde du silence ?

En fait, on entend les sons lors de la plongée : sifflement du détendeur, moteur de bateau, choc contre la bouteille... Notre perception de ces sons est modifiée par rapport celle en surface ; cela nous amène à adopter des règles de sécurité liées au milieu.

### 4.2 Vitesse du son

Dans l'air, la vitesse du son est de 330m/s.

Dans l'eau, la vitesse du son est multipliée par 4,5 ; elle est de l'ordre de 1500m/s.

### 4.3 Applications à la plongée

Nos perceptions vont être modifiées :

- Intensité : un son se propage mieux et plus loin dans l'eau que dans l'air
  - Direction : on identifie plus difficilement dans l'eau que dans l'air d'où vient le son, du fait que sa vitesse dans l'eau est beaucoup plus grande que dans l'air.
- ⇒ Communications entre plongeurs : choc contre la bouteille.
- ⇒ Rappel de plongeur : pétard de rappel.
- ⇒ Sécurité : lors de la remontée et avant de faire surface, être très attentif au bruit des bateaux à moteur.
- ⇒ Sondeur.

### 4.4 Exercice d'application

Des plongeurs sont au palier sous leur bateau de plongée. Un skipper est resté à bord. Une explosion a lieu à 3 km de là. Qui des plongeurs ou du skipper entend l'explosion en premier ? Au bout de combien de temps ?